

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เนื่องจากทำให้จำนวนการซ่อมบำรุงลดลง ช่วยประหยัดเงิน เวลา และมีความปลอดภัยมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มคุณสมบัติผิวของวัสดุให้กับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่าง ๆ ด้วยเทคนิควิศวกรรมการชุบแข็ง [1-9] ซึ่งทำให้โครงสร้างของวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้น สามารถต้านทานความร้อนได้ดี มีความทนทานต่อการสึกหรอ การกัดกร่อนหรือการล้า จึงมีความจำเป็นในงานทางวิศวกรรม

โดยทั่วไปแล้ววัสดุในกลุ่มโลหะเป็นที่นิยมนำมาปรับปรุงสภาพผิวด้วยวิธีการอบชุบแข็งทางเคมีแบบต่าง ๆ [10,11] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มของเหล็ก ซึ่งได้แก่ เหล็กกล้า เหล็กกล้าผสม และเหล็กหล่อ เป็นต้น โดยกลุ่มของเหล็กกล้าคาร์บอน เป็นกลุ่มที่นิยมนำมาทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย นอกจากนี้ยังคุณสมบัติในด้านความเหนียวสูง ทำให้มีความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness) ดังนั้น เวลาขึ้นรูปจึงง่ายกว่า เพราะจะทำให้ไม่เกิดความเสียหาย แต่ข้อเสียของเหล็กกล้าคาร์บอนคือ ไม่แข็งแรง ไม่ทนทานต่อการสึกหรอ การกัดกร่อนหรือการล้า [12,13]

วิธีปรับปรุงสภาพผิวแบบคาโบไนตรายดิง (carbonitriding) สามารถทำได้ด้วยการปรับปรุงวิธีของแก๊สคาบูไรซิง (gas carburizing) โดยเติมแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ลงในบรรยากาศแก๊สคาบูไรซิง ซึ่งอะตอมของไนโตรเจนและคาร์บอนจะเกิดการแพร่กระจายลงในเนื้อเหล็ก กระบวนการคาโบไนตรายดิงสามารถปฏิบัติภายใต้อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาสั้นกว่าการทำคาบูไรซิง ซึ่งมีค่าความแข็งเท่ากันแต่เกิดการบิดเบี้ยวน้อยกว่า [5] ในขณะที่การทำแก๊สไนตรายดิงจะส่งผลให้ผิวชั้นนอกเปราะ [14,15] ความแข็งและสมบัติการสึกหรอของเหล็กคาร์บอนต่ำที่ถูกอบชุบวิธีการคาโบไนตรายดิงจะดีกว่าเหล็กคาร์บอนต่ำที่ไม่ได้อบชุบทางความร้อนและทำการคาบูไรซิง [16]

ขณะที่การอบชุบแข็งทางเคมีของเหล็กคาร์บอนมีการใช้มากขึ้นในงานวิศวกรรม แต่มีงานวิจัยจำนวนน้อยที่ศึกษาถึงพฤติกรรมและกลไกการล้าของเหล็กคาร์บอนที่ผ่านการอบชุบแข็งทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเหล็กคาร์บอนต่ำที่อบชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง ซึ่งถูกใช้ในระบบส่งกำลังของรถจักรยานยนต์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมและกลไกการล้าของเหล็กคาร์บอนต่ำ (AISI 1015 steel) ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค ความแข็งจุลภาค สมบัติทางกลและการล้าพื้นผิว การแตกหัก ของเหล็กคาร์บอนต่ำ (AISI 1015 steel) ที่ไม่ชุบแข็งและที่ชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิง
- 1.2.2 ศึกษาผลกระทบของความเค้นคงค้างที่เกิดจากกระบวนการชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิงต่อพฤติกรรมและกลไกการล้าของเหล็ก 1015 คาร์บอนต่ำ (AISI steel) ที่ชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ทราบถึงโครงสร้างจุลภาค ความแข็งจุลภาค การทดสอบสมบัติทางกล และการล้าของ เหล็กคาร์บอนต่ำ (AISI 1015 steel) ที่ไม่ชุบแข็งและชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิง
- 1.3.2 เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมและกลไกการล้าที่มีผลกระทบต่อเหล็กคาร์บอนต่ำ (AISI 1015 steel) ที่ชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิงซึ่งนำไปสู่การเลือกใช้และออกแบบ ชั้นพื้นฐานของชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อความปลอดภัย

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ความแข็งจุลภาค สมบัติทางกลและการล้าของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1015) ที่ไม่ชุบแข็งและชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิงตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM E8M-96 (Tension testing of metallic materials [metric]) [17] ASTM

E384-89 (Microhardness of materials) [18] และ ASTM E466-96 (Conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials) [19] และศึกษาผลกระทบของความเค้นคงค้างแบบอัด (compressive residual stress) ต่อการเกิดและขยายตัวของรอยร้าว [20,21] ด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD) ของเหล็ก AISI 1015 เมื่อผ่านกระบวนการชุบแข็งแบบคาบไบนารีรายดิ่ง

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เหล็กคาร์บอนมีการใช้งานมาอย่างยาวนานและใช้กันอย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม โดยเกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยตรง ดังนั้น จึงมีผู้ที่ศึกษาข้อดีและข้อเสียรวมทั้งผลกระทบต่าง ๆ ในหลายสภาพการใช้งานของเหล็กคาร์บอนอย่างมากมาย โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางกลของโลหะที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิวสามารถสรุปได้ดังนี้

Farfan และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นความแข็งต่อสมบัติการล้าแบบวงรอบต่ำและแบบวงรอบสูงของเหล็ก AISI 8620 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาบไบนารี จากการศึกษาค้นคว้าได้สังเกตเห็นว่าความหนาผิวแข็งที่อิทธิพลต่อสมบัติการล้าของเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาบไบนารี โดยที่ความต้านทานการล้าจะสูงขึ้นตาม ความหนาของชั้นความแข็ง นอกจากนี้ยังให้ความเห็นว่า การเกิดรอยร้าวตามขอบเกรนมีหลายสาเหตุ เช่น การตกตะกอนหรือการสะสมของเฟสที่มีความเปราะตามขอบเกรน เกิดสภาพเปราะจากไฮโดรเจนตามขอบเกรน (hydrogen embrittlement) สิ่งแวดล้อมช่วยให้เกิดรอยร้าว เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน (intergranular corrosion) การแยกตัวตามขอบเกรนและเกิดรอยร้าวที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น จากผลวิเคราะห์ความเสียหายพบว่า พื้นที่การแตกหักประกอบด้วย 3 ส่วนคือ การแตกหักแบบเปราะตามขอบเกรน (intergranular) ที่ชั้นผิวแข็ง (case) การแตกหักแบบเหนียวที่เนื้อชั้นใน (core) ของชิ้นทดสอบ และแตกหักแบบเปราะและแบบเหนียวรวมกันที่รอยต่อระหว่างชั้นผิวแข็งและเนื้อชั้นใน นอกจากนี้ยังพบหลักฐานของรอยร้าวบนรอยต่อระหว่างชั้นผิวแข็งและเนื้อชั้นในของชิ้นทดสอบบางชิ้นอีกด้วย

Karadag และ Stephen [23] ได้ทำการทดสอบการล้าโดยใช้อัตราส่วนความเค้น (stress ratio, $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) 0.8 และ 0.9 สำหรับเหล็ก SAE 1045 ที่ผ่านการชุบแข็งจนมีระดับความแข็งต่าง ๆ ($10,37$ และ $50 R_c$) พบว่า ความต้านทานการล้า (fatigue resistance) ที่ค่า R สูง มีค่ามากกว่าความทนทานการล้าที่ค่า R ต่ำ และจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (strain) กับรอบอายุการล้าพบพฤติกรรมของ cyclic creep/ratcheting ในการทดสอบทุกระดับความแข็ง ซึ่งพฤติกรรมแบบ cyclic creep/ratcheting ที่เกิดจากการทดสอบนี้เป็นฟังก์ชันของเวลาและภาระที่มากกระทำ โดยขึ้นทดสอบ $R_c = 10$ และ 37 มี cyclic creep/ratcheting สูงกว่าขึ้นทดสอบ $R_c = 50$ ความเสียหายที่เกิดขึ้นของขึ้นทดสอบแรงดึงและขึ้นทดสอบการล้าที่ $R_c = 10$ และ 37 เป็นการแตกหักแบบเหนียว โดยที่ชั้นผิวแข็งข้างนอกประมาณ 40% แสดงการแตกหักที่เกิดจาก shear lip ในขณะที่เนื้อชั้นในผิวการแตกหักประกอบด้วยช่องว่างเล็ก ๆ จำนวนมากมาย ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของการแตกหักแบบเหนียวสำหรับขึ้นทดสอบการล้าที่ $R_c = 50$ จะประกอบด้วยความเสียหายที่อายุการล้าต่ำและอายุการสูง โดยขึ้นทดสอบการล้า $R_c = 50$ ที่มีอายุการล้าต่ำ บนผิวการแตกหักจะประกอบด้วยการแตกหักแบบเหนียว (ductile dimple) และการแตกหักแบบแข็ง (micro cleavage) เล็กน้อย ในขณะที่ขึ้นทดสอบการล้า $R_c = 50$ ที่มีอายุการล้าสูง ผิวการแตกหักจะแตกต่างกับขึ้นทดสอบอื่น ๆ ตรงที่ความเสียหายมีสาเหตุเกิดจากรอยร้าวจากการล้าที่ผิว (surface fatigue cracking) และบนผิวการแตกหักแสดงรอยร้าวแบบ thumbnail อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามการแตกหักส่วนใหญ่ของขึ้นทดสอบการล้า $R_c = 50$ ที่มีอายุการล้าสูง แสดงการแตกหักแบบเปราะ

McEvily และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาลักษณะของการล้าต่อการชุบแข็งคาบรูอิซิงของเหล็ก AISI 9310 พบว่าความแตกต่างระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาดในชั้นแข็งภายนอกและเนื้อภายในส่งผลให้เกิดความเค้นดึงในแนวรัศมี (radial tensile stress) ในเหล็กคาบรูอิซิงภายใต้ภาระแบบแรงดึงและวงรอบ และรอยร้าวจากการล้าเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างผิวแข็งชั้นนอกและเนื้อชั้นใน (case-core interface) ยิ่งไปกว่านั้นยังพบอีกว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความเค้นดึงในแนวรัศมี ซึ่งนำไปสู่การเกิดรอยร้าวที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวแข็งชั้นนอกและเนื้อชั้นใน มีอยู่ 2 ปัจจัยคือ ความแตกต่างของค่า Poisson ratio (ν) ระหว่างผิวแข็งชั้นนอก (case) และเนื้อชั้นใน (core) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเนื้อชั้นในเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก ในขณะที่ผิวชั้นนอกยังคงรักษาการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบอีลาสติกไว้ และอีกปัจจัยคือ ตำแหน่งของความเค้นดึงในอีกแนว (triaxial stress) ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณปลายรอยบาก (notch) ของขึ้นทดสอบ

Genel และคณะ [25] ได้ศึกษาผลของเหล็ก AISI 4140 ที่อบชุบแข็งแบบไอออนไนตรายภายใต้ภาวะแบบวงรอบ พบว่า ความแข็งแรงจากการล้าจะเพิ่มขึ้นตามความหนาผิวแข็งที่เพิ่มขึ้น (case depth) และประสิทธิภาพของความหนาผิวแข็ง (effective case depth) เพิ่มขึ้นตามผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการ (process time) นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบผลของ S-N curves ระหว่างเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบต่าง ๆ ได้แก่ การอบชุบแข็ง (quenched & tempered) การทำไนตรายในของเหลว (liquid nitriding) และไอออนไนตราย เป็นต้น ซึ่งพบว่าที่ความหนาผิวแข็งเท่ากัน การทำไอออนไนตรายจะมีอายุการล้าสูงที่สุด และยังพบอีกว่าถ้าใช้เวลาในการทำไอออนไนตรายเพิ่มขึ้น จะทำให้เหล็ก AISI 4140 มีขีดจำกัดการล้าสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า ความเค้นคงค้างแบบอัด (compressive residual stress) คือสาเหตุหลักที่ทำให้สมบัติการล้าดีขึ้น และได้นำเสนอรูปแบบการกระจายตัวของความเค้นต่าง ๆ บนพื้นที่หน้าตัด ซึ่งพบว่าความรวมของความเค้น (superposed stress) ระหว่างความเค้นคงค้างแบบอัดและความเค้นที่ใช้ในการทดสอบจะสูงที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวชั้นนอกและเนื้อชั้นใน (case-core interface) นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ผิวการแตกของเหล็ก AISI 4140 ที่ชุบแข็งแบบไอออนไนตรายมีสาเหตุมาจากมีรอยร้าวเริ่มต้นมาจากเกิดสิ่งเจือปนหรือสิ่งแปลกปลอม (inclusion) ที่แทรกอยู่ภายใน ซึ่งแสดงด้วยจุดตาปลา (fish-eye) บนพื้นผิวความเสีย

งานวิจัยของ Genel [26] ที่เกี่ยวข้องอีกงานคือ วิธีการประมาณหาขีดจำกัดการล้าของเหล็กชุบแข็งที่ผิว ซึ่งทดลองโดยใช้เหล็กหลายชนิดและการชุบแข็งที่ต่างกัน เพื่อสร้างแบบจำลองการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบนพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ซึ่งเริ่มต้นด้วยการกระจายของความเค้นที่เกิดจากการล้า (fatigue strength) รวมกับความเค้นคงค้างแบบอัดเนื่องจากการชุบแข็ง จนกลายเป็นการกระจายของความเค้นสุทธิ (net fatigue strength) ที่เกิดขึ้นบนพื้นที่หน้าตัดเปรียบเทียบกับระยะลึกจากผิว จากผลการคำนวณโดยอาศัยกฎความสัมพันธ์ของฮุก (Hook's law) พบว่า เมื่อความแข็งที่เนื้อชั้นในและระยะลึกจากผิว (effective case depth) เพิ่มขึ้นพร้อมกันจะมีผลทำให้ขีดจำกัดการล้าสูงขึ้นด้วย และจากภาพที่นำเสนอระยะลึกที่เหมาะสมจากผิว (optimal effective case depth) ของชิ้นทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 และ 10 มม. ในรูปแบบฟังก์ชันของความแข็งที่ผิว (core hardness) และความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิว ดูเหมือนว่า ระยะลึกจากผิวที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นพร้อมกับขนาดของชิ้นทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ผิวมีความเค้นคงค้างแบบอัดต่ำ และผลของความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิวของเหล็กที่

ผ่านการชุบแข็งแบบคานูไนซิงและผ่านการชุบแข็งแบบไนตรายดิงคือ -220 และ -350 MPa ตามลำดับ

Krauss [27] ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการแตกหักของเหล็ก AISI 8620 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคานูไนซิง พบว่า การชุบแข็งแบบคานูไนซิงของเหล็ก AISI 8620 ที่มีเกรนหยาบและที่ผิวมีคาร์บอนประมาณ 1% ค่อนข้างจะมีความไวต่อสภาวะออสเทนไนซิง (austenitizing) จากผลการตรวจสอบโครงสร้างของเหล็ก AISI 8620 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคานูไนซิงหลังจากการชุบแข็ง (oil quenching) พบว่าที่ผิวชั้นนอก โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยเฟลนมาร์เทนไซต์ (plate-martensite) รอยร้าวเล็ก ๆ (microcrack) และมากกว่า 30% ที่ผิวของชั้นทดสอบเป็นออสเทนไนท์ตกค้าง (retained-austenite) ในขณะที่เนื้อชิ้นใน โครงสร้างจุลภาคเป็นแบบเลธมาร์เทนไซต์ (lath-martensite) นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ผิวการแตกหักของเหล็กคานูไนซิงที่ชุบแข็งต่ำกว่าเส้น A_{cm} พบว่า ผิวชั้นนอกเกิดการแตกหักแบบตัดผ่านเกรน (transtranular) และพบการเกิดของ microvoid coalescence เนื่องจากคาร์ไบด์ (fine carbide) และผิวการแตกหักแบบแข็ง (cleavage) ในขณะที่เหล็กคานูไนซิงที่ชุบแข็งเหนือเส้น A_{cm} พบการแตกหักตามขอบเกรน (intergranular) ที่ผิวชั้นนอก เนื่องจากอนุภาคของฟอสฟอรัสที่แตกตัวออกมาระหว่างกระบวนการออสเทนไนซิง

Ando และ Krauss [28] ได้ศึกษาผลกระทบของฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นตามขอบเกรนซีเมนไทต์ (cementite) ในเหล็ก AISI 52100 พบว่า เหล็ก AISI 52100 ที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูง (0.023 wt pct) มีผลต่อการเกิดเฟสซีเมนไทต์ (cementite network) ตามขอบเกรนออสเทนไนท์โดยใช้ระยะเวลาในการเกิด (incubation time) สั้นกว่าเหล็ก AISI 52100 ที่มีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำ (0.009 wt pct) และเมื่อทำการชุบแข็งที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_{cm} คือที่อุณหภูมิ 960°C ถึงอุณหภูมิห้อง ในระหว่างกระบวนการออสเทนไนท์ (austenitizing) ฟอสฟอรัสจะรวมตัวกันในระหว่างเกิดเฟสซีเมนไทต์ขั้นตอนแรก (cementite/matrix interface) หลังจากนั้นจะแยกตัวออกมาตามขอบเกรนเมื่ออุณหภูมิลดลง และจากผลการทดสอบยังพบอีกว่า การแตกตัวของฟอสฟอรัสของเหล็ก AISI 52100 ที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงและต่ำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 785 °C จะใช้เวลาในการแตกตัวตามขอบเกรนเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 740 °C นอกจากนี้การตรวจสอบด้วยวิธี Auger electron spectroscopy (X-ray diffraction) ยังพบหลักฐานของฟอสฟอรัสตามขอบเกรน (intergranular) หลังจากเกิดการแตกหักที่ผิวอีกด้วย

Guagliano และ Vergani [29] ได้ศึกษาวิธีการทำนายความแข็งแรงจากการล้าของชิ้นส่วนที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวโดยการยิงด้วยอนุภาคของแข็ง (shot peening) ซึ่งได้นำเสนอผลการทดลองด้วยโปรแกรมไฟไนท์ (finite element) เพื่อใช้อธิบายกลไกการขยายตัวของรอยร้าวควบคู่ไปกับผลทดลองจริงของเหล็ก 39NiCrMo3 (Italy standard) ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวโดยการยิงด้วยอนุภาคของแข็งแล้ว พบว่า อนุภาคของแข็งขนาด 0.6 มม. มีผลทำให้ขีดจำกัดการล้าของเหล็ก 39NiCrMo3 สูงกว่าอนุภาคขนาดของแข็ง 0.3 มม. เนื่องจากที่ผิวของชิ้นทดสอบทั้ง 2 ชนิดเกิดความเค้นคงค้างที่ผิวแตกต่างกัน และผลการวัดความเค้นคงค้างที่ผิวด้วยวิธี X-ray diffraction พบว่า ความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิวของเหล็กที่ถูกยิงด้วยอนุภาคของแข็งขนาด 0.6 มม. จะสูงกว่าเหล็กที่ถูกยิงด้วยอนุภาคของแข็งขนาด 0.3 มม. นอกจากนี้ยังพบอีกว่า สาเหตุที่ความแข็งแรงการล้าของเหล็ก 39NiCrMo3 ดีขึ้นเป็นเพราะว่า ผลของความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิวและผลของความเค้นคงค้างแบบอัดสูงสุดใต้ผิว และจากผิวการแตกหักพบหลักฐานของรอยร้าวที่ไม่ขยายตัวปรากฏ

Farrahi และ Ghadbeigi [30] ได้ศึกษาผลกระทบของการอบชุบผิวหลายประเภทต่ออายุการล้าของเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D3 จากผลการทดลองพบว่า การทำไนโตรายดิงและไตรคาบูไรซิงไม่เป็นผลดีต่อการต้านทานการล้าของเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D3 ซึ่งผลการทดสอบการล้าเปิดเผยว่า การยิงด้วยอนุภาคของแข็งที่ผิว (shot peening) ทำให้อายุการล้าเพิ่มขึ้นถึง 14% ในขณะที่ไนโตรายดิงแบบ 2 ชั้นจะลดอายุการล้าลงถึง 8% นอกจากนี้ยังพบอีกว่า การทำไนโตรคาบูไรซิงและการทำไนโตรายดิงแบบ 1 ชั้นจะลดอายุการล้าของชิ้นทดสอบถึง 29% และ 50% ตามลำดับ จากผิวการแตกหักพบว่า การชุบแข็งแบบไนโตรคาบูไรซิงที่ผิวจะมีลักษณะเป็นรูพรุนเนื่องจากมีโมเลกุลของไนโตรเจนแพร่กระจายที่ผิว ในขณะที่การชุบแข็งแบบไนโตรายดิงโครงสร้างภายในมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าและเกิดใกล้กับรอยต่อระหว่างชั้นสารประกอบ (compound layer) และชั้นแพร่กระจาย (diffusion layer) นอกจากนี้ที่ผิวยังมีความขรุขระมากกว่าชิ้นทดสอบไนโตรคาบูไรซิง ดังนั้นจึงเกิดรอยร้าวในเวลาสั้นกว่า และรอยร้าวอาจจะขยายด้วยอัตราเร็วสูงผ่านโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่เป็นเหตุให้เกิดการแตกหักอย่างสมบูรณ์ในที่สุด อย่างไรก็ตาม การยิงอนุภาคของแข็งขนาดเล็กทำให้อนุภาคของคาร์ไบต์และการสะสมของอนุภาคอื่น ๆ ที่ผิวมีความละเอียด นอกจากนี้ยังเกิดความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิวจึงทำให้ความต้านทานการล้าดีขึ้น

Widmark และ Melander [4] ได้ศึกษาผลกระทบของวัสดุ การอบชุบทางความร้อน การเจียระไน และการยิงด้วยอนุภาคของแข็งต่ออายุการล้าแบบสัมผัส (contact fatigue) ของเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาบรูไรซิง พบว่า ความเค้นคงค้างแบบอัดของเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งจะต่ำกว่าเหล็กที่ผิวผ่านการยิงด้วยอนุภาคของแข็ง ในขณะที่การเจียระไนสามารถเพิ่มความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิวของเหล็กชุบแข็งได้ อย่างไรก็ตาม การยิงด้วยอนุภาคของแข็งทำให้ที่ผิวเกิดความเค้นคงค้างแบบอัดสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ความแข็งที่ผิวสูงจะเพิ่มความแข็งแรงจากการล้าและทำให้รอยร้าวจากการล้าเกิดขึ้นช้าลง และบริเวณที่มีความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิวสูงก็ทำให้รอยร้าวเกิดขึ้นช้าลงเช่นกัน และยังขัดขวางการขยายตัวของรอยร้าวอีกด้วย ผลการวิเคราะห์การแตกหักพบว่า กลไกการล้าหลังจากทดสอบการล้าที่ 3,000 รอบ เมื่อมีภาระกระทำที่ผิวสัมผัสจะเกิดเป็นรอยสะสมเพิ่มขึ้น หลังจากทดสอบการล้าที่ 30,000 รอบ จะปรากฏรอยร้าวแบบตื้น ๆ เรียกว่า "clamshell" เกิดขึ้นที่ผิว และหลังจากทดสอบที่ 300,000 รอบ พบการขยายตัวของรอยร้าวและเกิดเป็นความเสียหายในที่สุด

Colombo และคณะ [31] ได้ศึกษาพฤติกรรมการขยายตัวของรอยร้าวจากการล้าของเหล็ก 39NiCrMo3 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบไนตรายดิงและผ่านการยิงอนุภาคของแข็งที่ผิว ผลการทดสอบการล้าพบว่า ขึ้นทดสอบ 39NiCrMo3 ที่ชุบแข็งแบบไนตรายดิงและผ่านการยิงอนุภาคของแข็งที่ผิวแล้วทำให้ความแข็งแรงจากการล้าดีขึ้น เนื่องจากที่ผิวเกิดความเค้นคงค้างแบบอัด นอกจากนี้ยังพบอีกว่า พฤติกรรมการล้าที่แตกต่างกันสอดคล้องกับรูปแบบของความเค้นคงค้างอีกด้วย และผลการวิเคราะห์ผิวการแตกหักพบว่า ขึ้นทดสอบแบบ N (ไนตรายดิง) และ 12A150 (shot peening) รอยร้าวมักจะเริ่มต้นเกิดจากรูเจาะและพบหลักฐานของรอยร้าวที่ไม่ขยายตัวในทางกลับกัน ขึ้นทดสอบแบบ 12A100 และ 18A150 รอยร้าวเกิดจากสิ่งเจือปนภายใน (inclusion) และรูเจาะรวมกัน ในขณะที่ขึ้นทดสอบแบบ 18A100 การแตกหักเกิดจากสิ่งเจือปนเพียงอย่างเดียว

Montross และคณะ [2] ได้ศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงสภาพผิวด้วยคลื่นแบบเลเซอร์ต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของโลหะผสมหลายชนิดพบว่า การปรับปรุงสภาพผิวด้วยการยิงด้วยคลื่นเลเซอร์ มีผลทำให้สมรรถภาพของการล้าสูงขึ้น โดยการยิงด้วยคลื่นจากเลเซอร์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก นอกจากนี้ผลการวัดความเค้นคงค้างพบว่า การปรับปรุงสภาพผิวด้วยการยิงของคลื่นจากเลเซอร์จะทำให้เกิดความเค้นคงค้างแบบอัดที่ผิวสูงกว่าการยิงด้วย

อนุภาคของแข็งโดยวิธีทั่วไป โดยมีระยะลึกจากผิวของการกระจายความเค้นคงค้างแบบอัดอยู่ในช่วงจาก 0.5 ถึง 1 มม.หรือมากกว่านั้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่า การยิงด้วยคลื่นจากเลเซอร์มีผลทำให้โครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงและเพิ่มความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ของชั้นอะตอม (dislocation) สูงขึ้น จากผลการทดสอบการล้าพบว่า เหล็กที่ผ่านการยิงด้วยคลื่นจากเลเซอร์มีผลต่อการเติบโตของรอยร้าวจากการล้า โดยที่รอยร้าวใช้เวลาในการเกิดนานกว่าการยิงด้วยอนุภาคของแข็ง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ผลการวิจัยส่วนใหญ่ที่ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการปรับสภาพผิวจะเน้นใช้กับโลหะที่มีการใช้งานเฉพาะกลุ่ม เช่น กลุ่มเหล็กคาร์บอนสูง (AISI 1045 steel) หรือในกลุ่มโลหะผสม เช่น AISI 4140 AISI 8620 39NiCrMo3 เป็นต้น ซึ่งในอุตสาหกรรมเหล็กดังกล่าวค่อนข้างมีราคาแพงและไม่สามารถใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งตรงกันข้ามกับเหล็กคาร์บอนต่ำที่มีใช้เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอย่างกว้างขวาง และมีราคาถูกกว่า ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่า ไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเหล็กคาร์บอนต่ำ (AISI 1015 steel) ที่ชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิงอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาผลการกระทบของสมบัติทางกล สมบัติการล้า รวมทั้งวิเคราะห์ความเสียหายของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1015) ที่ชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิง